

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-44-3-173-194>

Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 550.8.07; 550.8.08



Некоторые методы дополнительной обработки данных георадиолокации на примере радарограмм, полученных в кратере вулкана Горелый (Камчатка)

В. Ю. Павлова^{1}, Г. М. Водинчар², М. Ю. Некрасова³*

¹ Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, 683032, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4, Россия

² Камчатский государственный технический университет, 683003, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35, Россия

³ Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 683023, г. Петропавловск-Камчатский, бул. Пийпа, 9, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты работы с прибором георадар «ОКО-250» в кратере вулкана Горелый (Камчатка). В мировой практике это первый опыт проведения исследования методом георадиолокации в кратере активного вулкана. В 2010-2011 году на вулкане Горелый регистрировалось непрерывное спазматическое вулканическое дрожание. Периодически из кратера вулкана наблюдалась парогазовая деятельность. В августе 2011 года, когда были проведены полевые работы, сейсмичность на вулкане Горелый продолжала оставаться выше фона. Данная работа является частью исследований, направленных на решение основной цели, которая заключается в создании научно-методической основы метода георадиолокации применительно к Камчатке, включая методику обработки и интерпретации данных, с учетом практического опыта применения на различных объектах. Одна из решаемых задач, затрагиваемая в данных исследованиях, заключается в применении некоторых методов дополнительной обработки результатов зондирования на конкретных объектах исследования для изучения особенностей волновой картины на радарограммах. Представленные в работе методы дополнительной обработки радарограмм позволяют детально проанализировать волновую картину. При этом выбор методов будет зависеть от поставленных целей и решаемых задач.

Ключевые слова: Камчатка, вулкан Горелый, георадар, метод георадиолокации, радарограммы, обработка данных, сейсмичность вулкана.

Получение: 10.10.2023; Исправление: 20.10.2023; Принятие: 28.10.2023; Публикация онлайн: 02.11.2023

Для цитирования. Павлова В.Ю., Водинчар Г.М., Некрасова М.Ю. Некоторые методы дополнительной обработки данных георадиолокации на примере радарограмм, полученных в кратере вулкана Горелый (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2023. Т. 44. №3. С. 173-194. EDN: QARMVO. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-44-3-173-194>.

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030. Дальний Восток».

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

***Корреспонденция:**  E-mail: verpavlova88@gmail.com

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Павлова В. Ю., Водинчар Г. М., Некрасова М. Ю., 2023

© ИКИР ДВО РАН, 2023 (оригинал-макет, дизайн, составление)





Some Methods of Additional Processing of GPR Data on the Example of Radargrams Obtained in the Crater of the Gorely Volcano (Kamchatka)

V. Yu. Pavlova^{1*}, G. M. Vodinchar², M. Yu. Nekrasova³

¹ Vitus Bering Kamchatka State University, 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, Pogranichnaya str., 4, Russia

² Kamchatka State Technical University, 683003, Petropavlovsk-Kamchatsky, Klyuchevskaya str., 35, Russia

³ Kamchatsky branch of the Federal Research Center «Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences», 683023, Petropavlovsk-Kamchatsky, bul. Piipa, 9, Russia

Abstract. The article presents the results of work with the georadar «OKO-250» in the crater of the Gorely volcano (Kamchatka). In world practice, this is the first experience of conducting research using the method of ground-penetrating radar in the crater of an active volcano. In 2010-2011, continuous spasmodic volcanic trembling was recorded on Gorely volcano. Steam-gas activity was periodically observed from the crater of the volcano. In August 2011, when field work was carried out, seismicity at Gorely volcano continued to remain above background. This work is part of the research aimed at solving the main goal, which is to create a scientific and methodological basis for the GPR method in relation to Kamchatka, including the methodology for processing and interpreting data, taking into account practical experience of application at various sites. One of the tasks addressed in these studies is the use of some methods for additional processing of sounding results on specific objects of study in order to study the features of the wave pattern on radargrams. The methods of additional processing of radargrams presented in the paper make it possible to analyze the wave pattern in detail. In this case, the choice of methods will depend on the goals and tasks to be solved.

Key words: Kamchatka, Gorely volcano, georadar, the GPR method, radargrams, data processing, volcano seismicity.

Received: 15.09.2023; Revised: 16.10.2023; Accepted: 31.10.2023; First online: 02.11.2023

For citation. Pavlova V. Yu., Vodinchar G. M., Nekrasova M. Yu. Some methods of additional processing of GPR data on the example of radargrams obtained in the crater of the Gorely volcano (Kamchatka). *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2023, 44: 3, 173-194. EDN: QARMVO. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-44-3-173-194>.

Funding. The work was carried out as part of the implementation of the Strategic Academic Leadership Program «Priority 2030. Far East»

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*Correspondence:  E-mail: verpavlova88@gmail.com

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Pavlova V. Yu., Vodinchar G. M., Nekrasova M. Yu., 2023

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2023 (original layout, design, compilation)



Введение

Актуальность исследований заключается в следующем:

1. Для оптимизации метода георадиолокации необходимо сопоставление и анализ результатов наблюдений в различных геологических условиях.
2. Поскольку метод георадиолокации интенсивно развивается в последние годы, то теоретические исследования в области обработки данных необходимо иллюстрировать многочисленными примерами практического использования георадаров на разных объектах исследования.

Цель исследований заключается в создании научно-методической основы метода георадиолокации применительно к Камчатке, включая методику обработки и интерпретации данных, с учетом практического опыта применения на различных объектах.

Одна из задач исследований (затрагиваемая в данной работе): применение некоторых методов дополнительной обработки результатов зондирования на конкретных объектах исследования для изучения особенностей волновой картины на радарограммах.

Состояние изученности:

1. В мировой практике это первый опыт проведения исследования методом георадиолокации в кратере активного вулкана.
2. Впервые на Камчатке проведены исследования методом георадиолокации в кратере вулкана Горелый.
3. Некоторые методы дополнительной обработки данных георадиолокации, представленные в работе, впервые применены для радарограмм, полученных в кратере активного вулкана.

Объект исследования (рис.1): Вулкан Горелый (52.55° с.ш., 158.03° в.д., абсолютная высота вершины 1829 м) – один из действующих вулканов Камчатки, ближайший к г. Петропавловску-Камчатскому. Он находится в относительно доступной местности в 70 км от города и в 25 км от берега Тихого океана. Постройка вулкана Горелый представлена линейным вулканическим хребтом длиной 3 км [1], по другим данным 7 км [2], вытянутым в субширотном, западно-северо-западном направлении. Она состоит из трех главных, длительно действовавших конусов (Горелый-1-3) и более чем трех десятков конусов одноактных побочных прорывов [3]. Сам вулкан сложен преимущественно базальтовыми и андезитобазальтовыми породами [2, 4, 5]. Все сооружение располагается в обширной кальдере, имеющей овальную, удлинненную к северо-западу форму и размеры по осям 9×13 км [3], площадью около 100 км^2 [2].

Стратовулкан Горелый относят к щитообразным, т.е. переходным по типу к пологим щитовым, существенно лавовым сооружениям. На вершине обнажаются современные и нерасчлененные голоценовые отложения: резургентные пеплы и

глыбы последних извержений вулкана Горелый, андезито-базальты и андезиты. Поверх слоев, облегающих днища и основания стенок этих кратеров, залегают горизонтально-слоистые пачки обломочного материала и лав.

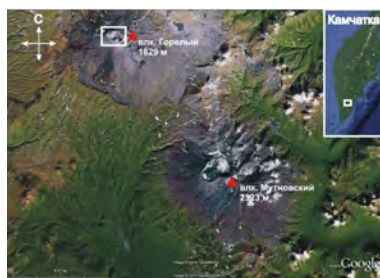


Рис. 1. Карта района исследований. Участок проведения работ отмечен прямоугольником (кратер вулкана Горелый).

[Fig. 1. Map of the study area. The work area is marked with a rectangle (the crater of the Gorely volcano).]

Характерны слоистые отложения разной мощности (рис. 2, 3).



Рис. 2. Кратер вулкана Горелый (фото В. Ю. Павловой).
[Fig. 2. Crater of Gorely volcano (photo by V. Yu. Pavlova).]



Рис. 3. Кратер вулкана Горелый. Для масштаба красным овалом выделены люди (фото В. Ю. Павловой).
[Fig. 3. Crater of Gorely volcano. People are marked for scale with a red oval (photo by V. Yu. Pavlova).]

При проведении исследований в кратере вулкана Горелый, с учетом сложного рельефа, большой высоты, было выбрано два профиля на наиболее удобных площадках для проведения работ: профиль 1 – на юго-западной стороне напротив северо-восточной стенки активного кратера постройки Горелый-2, профиль 2 – на северо-восточной стороне неактивного (восточного) кратера постройки Горелый-3. (рис. 4).

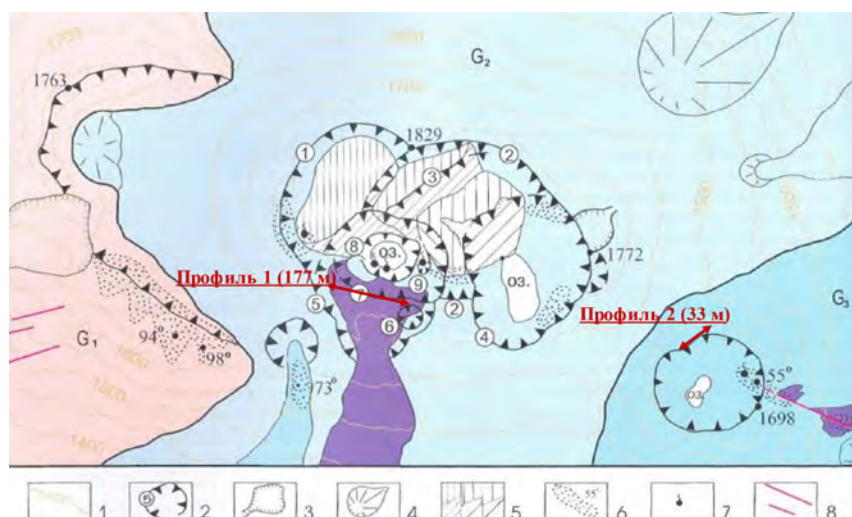


Рис. 4. Геолого-морфологическая схема вершинной зоны в. Горелый [6] с отмеченными георадиолокационными профилями 1 и 2. Условные обозначения: 1 – изолинии рельефа; 2 – кратеры в. Горелый-2 и их номера от ранних к поздним; 3 – бровки эрозионных рытвин и барранкосов; 4 – шлаковые конусы побочных прорывов; 5 – комплексы заполнения кратеров Горелого-2; 6, 7 – термальные площадки и значения температур их разогрева в 1980 г.; 8 – трещины. Цветом и индексами G показаны комплексы вулканитов основных конусов, составляющих постройку в. Горелый (Горелый 1 – 3) и молодых излияний.

[Fig. 4. Geological and morphological scheme of the summit zone of the Gorely volcano [6] with marked georadar profiles 1 and 2. Legend: 1 – relief isolines; 2 – craters Gorely-2 and their numbers from early to late; 3 – edges of erosion potholes and barrancos; 4 – slag cones of side breakthroughs; 5 – complexes filling Gorely-2 craters; 6, 7 – thermal sites and temperatures of their heating in 1980; 8 – cracks. The color and indices G show the volcanic assemblages of the main cones that make up the edifice c. Burnt (Burned 1 - 3) and young outpourings.]

Сейсмичность вулкана Горелый

Сейсмические наблюдения на вулкане Горелый проводятся с 1980 г. Камчатским филиалом Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая Службы» Российской Академии наук (КФ ФИЦ ЕГС РАН).

В районе вулкана Горелый, на расстоянии 2.5 км от кратера, расположена радиотелеметрическая сейсмическая станция «Горелый» (GRL). После установки сейсмостанции, в 1980-1981 гг., были впервые получены сейсмометрические данные в период эксплозивного извержения влк. Горелый. Летом 2008 года в данном районе установили еще две радиотелеметрические сейсмические станции «Мутновка» (MTV) и «Асача» (ASA) (рис. 5). Все станции оборудованы трехкомпонентными комплектами короткопериодных каналов на базе сейсмометров СМ-3 для регистрации скорости смещения грунта в полосе частот 0.8 – 30 Гц [7].

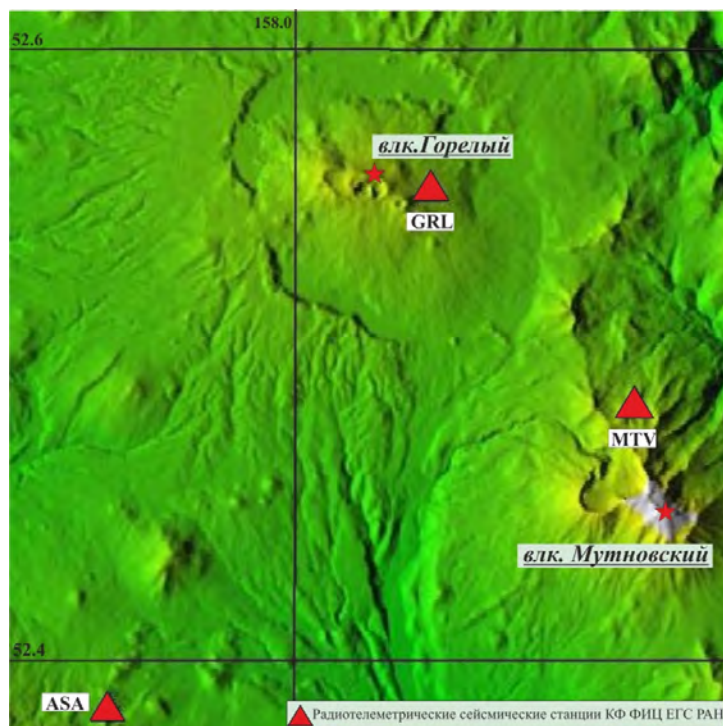


Рис. 5. Схема расположения станций РТСС КФ ФИЦ ЕГС РАН в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов.

[Figure 5. Scheme of the location of RTSS stations of the Kamchatsky branch of the Federal Research Center «Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences» in the area of the Mutnovsko-Gorelovskaya group of volcanoes.]

На сейсмостанции GRL регистрируются землетрясения района влк. Горелый с минимальными величинами энергетических классов по S-волне $K_s = 1.6$. Информация о состоянии активных вулканов Камчатки по данным сейсмических и визуальных и видео наблюдений (<http://www.emsd.ru/ssl/monitoring/main.htm>) отображена в фактографической базе данных «Активность вулканов Камчатки». База создана и пополняется сотрудниками Лаборатории Исследования сейсмической и вулканической активности КФ ФИЦ ЕГС РАН ежедневно. В базе представлена таблица сводных данных о сейсмичности действующих вулканов Камчатки., учтены сейсмические события на вулканах, регистрируемые хотя бы одной сейсмической станцией.

Для описания состояния вулкана Горелый в качестве опорной станции принимается ближайшая сеймостанция GRL. Оцениваются параметры сейсмичности в районе вулкана, осредненные за сутки. Все зарегистрированные сейсмические события разделяются на типы по классификации П.И. Токарева, адаптированной к цифровой обработке (рис. 6) [8].

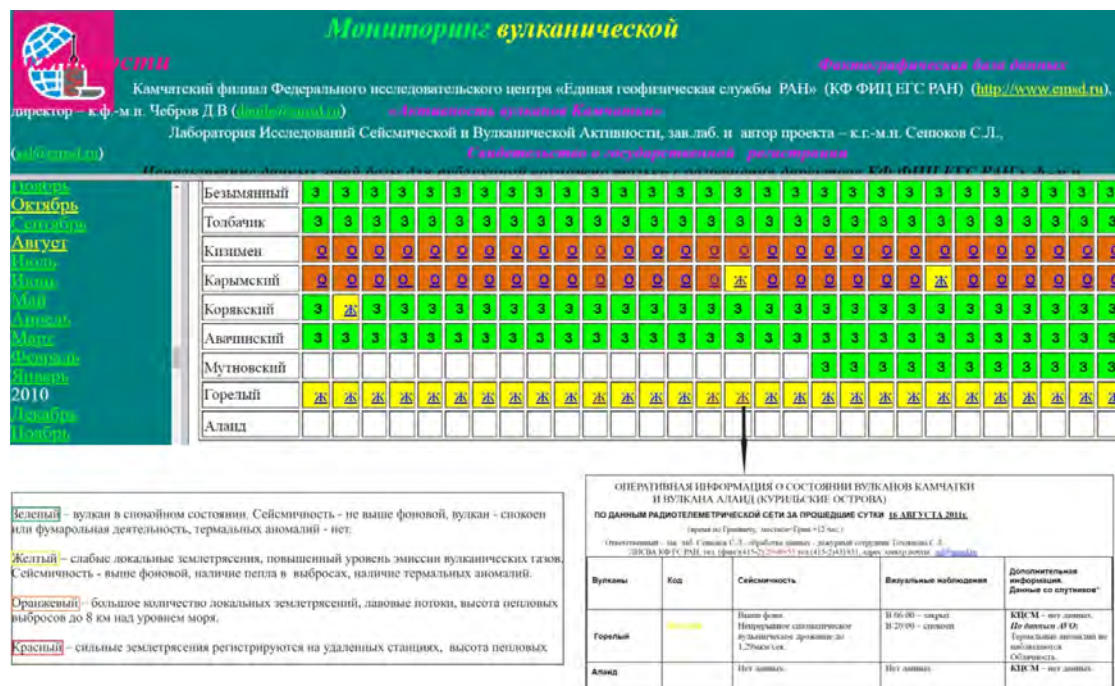


Рис. 6. Вид Фактографической базы «Активность вулканов Камчатки» КФ ФИЦ ЕГС РАН.

[Figure 6. View of the Factographic base «Volcanic activity of Kamchatka» of the Kamchatsky branch of the Federal Research Center «Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences».]

В период 1986-2007 гг. редкие сейсмические события из района вулкана Горелый не сопровождали никаких проявлений вулканической активности. В течение 2007-2009 гг. на вулкане стала регистрироваться повышенная сейсмическая активность. Появилось вулканическое дрожание и количество зарегистрированных сейсмических событий увеличилось. Количество землетрясений в районе вулкана, резко возросло весной 2009 года. В 2010-2011 году на вулкане Горелый регистрируется непрерывное спазматическое вулканическое дрожание. Периодически из кратера вулкана наблюдалась парогазовая деятельность. В августе 2011 года, сейсмичность на вулкане Горелый продолжала оставаться выше фона. Желтый код сейсмической активности присвоен вулкану с 19 апреля 2010 г. В течение суток 16 августа 2011 года наблюдалось непрерывное спазматическое вулканическое дрожание до 1.29 мкм/с (рис. 7). Термальные аномалии не наблюдались.

По состоянию на август 2011 года из жерла в основании северо-восточной стенки активного кратера продолжалась активность, что видно даже на фото (рис. 8).

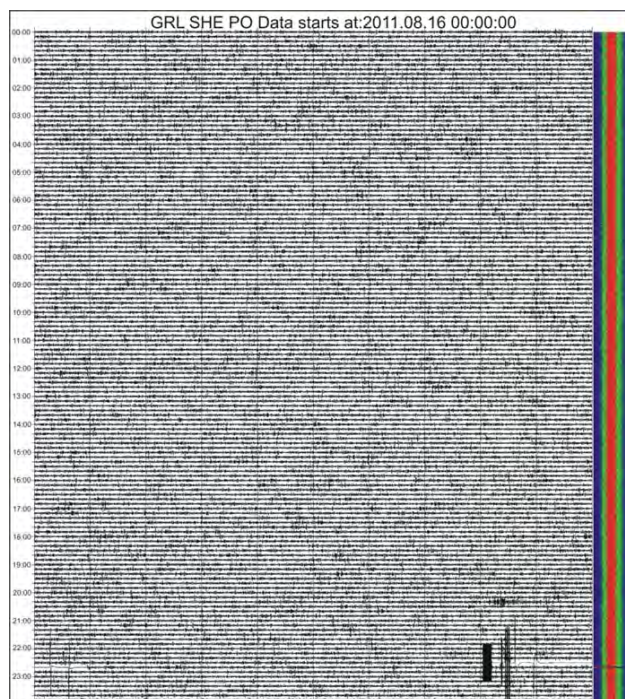


Рис. 7. Сейсмограмма за 16 августа 2011 г. и ее сван-диаграмма (вулкан Горелый, Камчатка).

[Figure 7. Seismogram for August 16, 2011 and its swan-diagram (Gorely volcano, Kamchatka).]



Рис. 8. Активный кратер вулкана Горелый (фото В. Ю. Павловой).

[Figure 8. Active crater of Gorely volcano (photo by V. Yu. Pavlova).]

Метод георадиолокации

Для проведения исследований использовали имеющийся в наличии прибор георадар «ОКО-2» с центральной частотой 250 МГц, глубиной зондирования 8 м и разрешающей способностью 0.25 м (рис. 9,10).

Метод георадиолокации (Ground-penetrating radar, GPR) как метод геофизического обследования основан на излучении широкополосного сигнала радиочастотного диапазона в толщу среды и регистрации отклика – сигнала, являющегося суперпозицией амплитуд прямых, отраженных и преломленных волн, достигших приемной антенны [9].



Рис. 9. Оператор с георадаром «ОКО-2» в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов (Камчатка). На заднем плане вулкан Горелый (фото В.Ю. Павловой).

[Fig. 9. An operator with the «ОКО-2» georadar in the area of the Mutnovsko-Gorelovskaya group of volcanoes (Kamchatka). Gorely volcano is in the background (photo by V. Yu. Pavlova).]

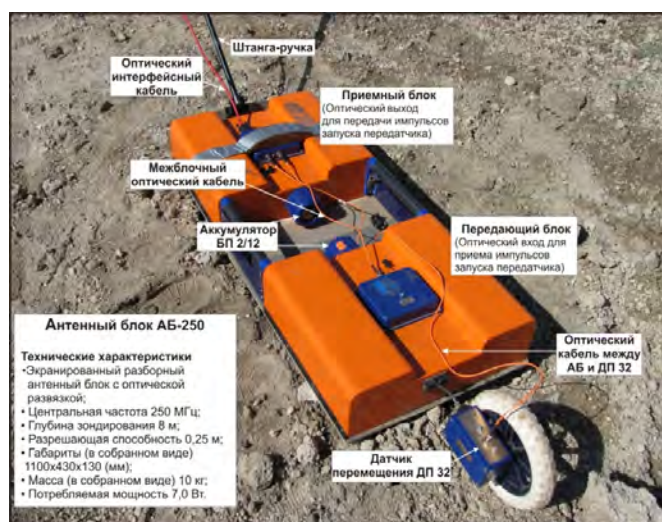


Рис. 10. Функциональная схема георадара «ОКО-250».

[Fig. 10. Functional diagram of the georadar «ОКО-250».]

Метод основан на явлении отражения электромагнитной волны от границ неоднородностей в изучаемой среде, на которых скачкообразно изменяются

электрические свойства: электропроводность и диэлектрическая проницаемость. Излучаемые георадаром электромагнитные сверхширокополосные импульсы, распространяющиеся в обследуемой среде, отражаются от находящихся там объектов и слоев грунта, принимаются антенной, усиливаются, преобразуются в цифровой вид и обрабатываются на ЭВМ. Далее информация об обнаруженном объекте визуализируется на мониторе (рис. 11) [10].

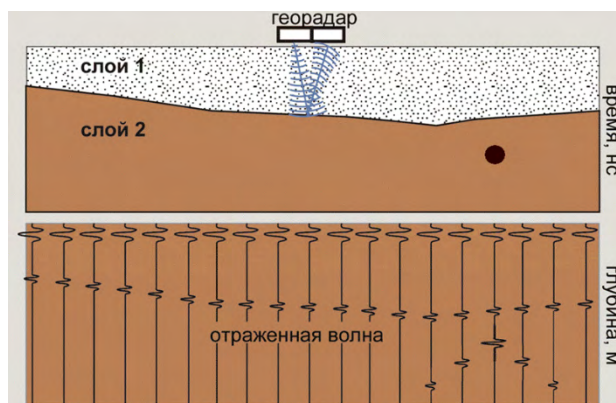


Рис. 11. Принцип метода георадиолокации [11].

[Fig. 11. The principle of the GPR method [11].]

В результате георадиолокационных исследований получают временные разрезы, называемые радарограммами. Радарограммы – это волновая картина, совокупность трасс вдоль профиля съемки, протяженные по глубине оси синфазности отраженного сигнала, белые (отрицательные полуволны) и черные (положительные полуволны). Они записываются методом переменной плотности, на которых по горизонтали указывается расстояние в метрах, а по вертикали – время прихода отраженных сигналов в наносекундах [12]. Пример радарограммы приведен на рис. 12.

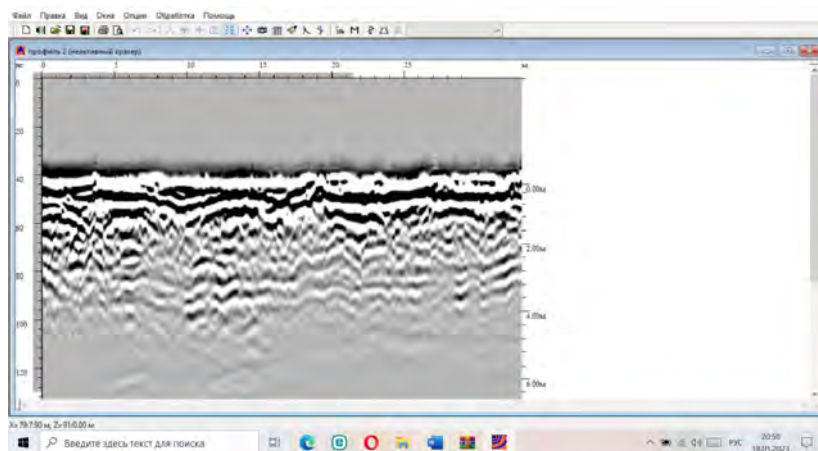


Рис. 12. Изображение радарограммы в программе GeoScan32.

[Fig. 12. Image of a radargram in the GeoScan32 program.]

После предварительной обработки в сигнале содержится сумма отраженных сигналов от объектов. Каждый такой отраженный сигнал от границы раздела сред имеет вид затухающего осциллирующего сигнала, состоящего из нескольких (3-5) полупериодов.

Результаты

Анализируя волновую картину радарограммы, полученной в активном кратере, можно выделить горизонтальные протяженные оси синфазности, далее происходит затухание электромагнитных волн с глубины 2 м (рис. 13).

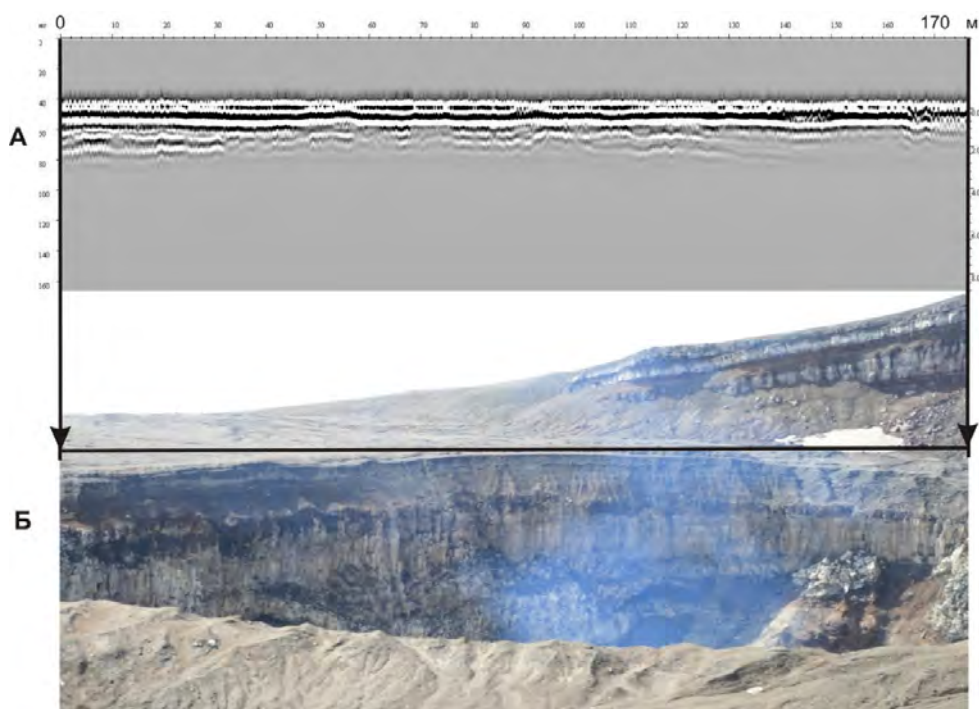


Рис. 13. Радарограмма по профилю 1. Условные обозначения: А – радарограмма, вертикальная шкала слева – время электромагнитной волны, нс, вертикальная шкала справа – глубина, м, горизонтальная шкала – расстояние, м; Б – юго-западная стенка активного кратера (постройка вулкана Горелый-2), где черной линией отмечены границы профиля 1.

[Fig. 13. Radargram along the profile 1. Legend: A – radargram, vertical scale on the left – electromagnetic wave time, ns, vertical scale on the right – depth, m, horizontal scale – distance, m; B – the southwestern wall of the active crater (the edifice of the Gorely-2 volcano), where the black line marks the boundaries of profile 1.]

Цветовой контраст приведен в согласии с геологической картой О. Б. Селянгина [6]. До глубины 2 м четко выделяются горизонты вулканических пеплов в переслаивании с андезито-базальтовыми потоками. Мульдообразные понижения, угловые несогласия верхней части отложений у стенки кратера отсутствуют (рис. 14).

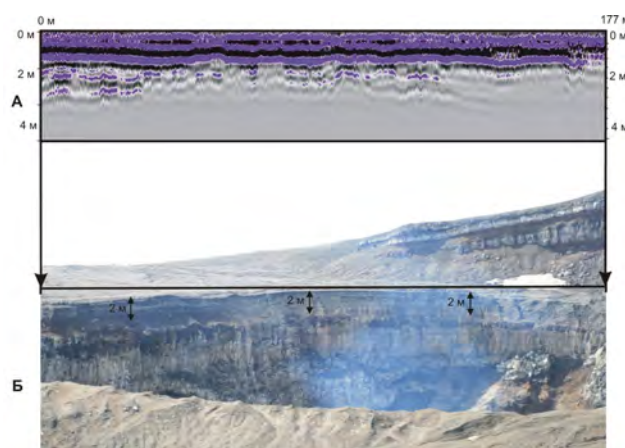


Рис. 14. Интерпретация радарограммы по профилю 1. Условные обозначения: А – радарограмма, вертикальная шкала – глубина, м, горизонтальная шкала – расстояние, м; Б – юго-западная стенка активного кратера (постройка вулкана Горелый-2), где черной линией отмечены границы профиля 1. Выделенные отложения соответствуют горизонтам вулканических пеплов и андезито-базальтам.

[Fig. 14. Interpretation of the radargram along the profile 1. Legend: A - radargram, vertical scale - depth, m, horizontal scale - distance, m; B – the southwestern wall of the active crater (the edifice of the Gorely-2 volcano), where the black line marks the boundaries of profile 1. The identified deposits correspond to the horizons of volcanic ash and andesite-basalts.]

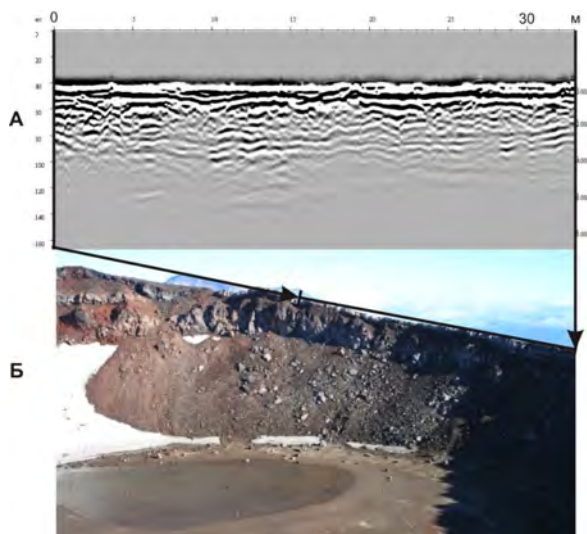


Рис. 15. Радарограмма по профилю 2. Условные обозначения: А – радарограмма, вертикальная шкала слева – время электромагнитной волны, нс, вертикальная шкала справа – глубина, м, горизонтальная шкала – расстояние, м; Б – северо-восточная стенка кратера (постройка вулкана Горелый-3), где черной линией отмечены границы профиля 2.

[Fig. 15. Radarogram along the profile 2. Legend: A – radargram, vertical scale on the left – electromagnetic wave time, ns, vertical scale on the right – depth, m, horizontal scale – distance, m; B – northeastern wall of the crater (the edifice of the Gorely-3 volcano), where the black line marks the boundaries of profile 2.]

Анализируя волновую картину радарограммы, полученной в неактивном кратере, можно выделить с некоторым углом наклона горизонтальные протяженные оси синфазности, которые четко выделяются до глубины 4 м, далее происходит их затухание (рис. 15). Это соответствует залеганию лав и пирокластики андезито-базальтового состава умеренно эродированных со временем, характерных для данного кратера. Отсюда некоторые углы наклона в их залегании и смещение слоев (рис. 16).

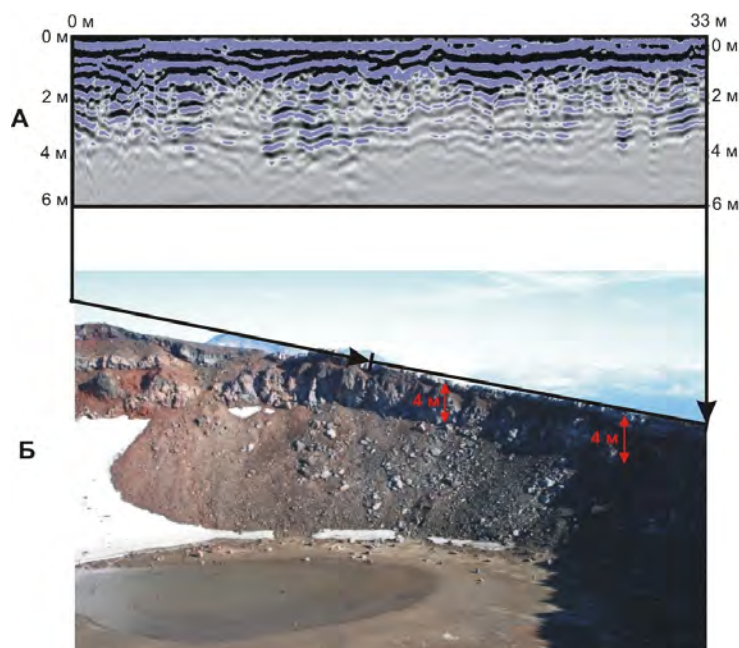


Рис. 16. Интерпретация радарограммы по профилю 2. Условные обозначения: А – радарограмма, вертикальная шкала – глубина, м, горизонтальная шкала – расстояние, м; Б – северо-восточная стенка кратера (постройка вулкана Горелый-3), где черной линией отмечены границы профиля 2. Выделенные отложения соответствуют вулканическим пеплам и андезито-базальтам.

[Fig. 16. Interpretation of the radargram along the profile 2. Legend: A - radargram, vertical scale - depth, m, horizontal scale - distance, m; B – northeastern wall of the crater (the edifice of the Gorely-3 volcano), where the black line marks the boundaries of profile 2. The isolated deposits correspond to volcanic ash and andesite-basalts.]

Программа GeoScan32 кроме визуализации радарограмм дает возможность проведения некоторой дополнительной обработки и отображения данных зондирования. Однако этот функционал весьма ограничен. Рассмотрим некоторые доступные методы.

Преобразование Гильберта. Известно, что преобразование Гильберта вещественного сигнала не что иное, как импульсная характеристика линейного фильтра [13], на выходе которого формируется ортогональное дополнение входного сигнала. Модуль преобразования Гильберта дает огибающую сигнала, а его аргумент имеет смысл мгновенного значения фазы. По результату нельзя получить

информацию о знаке отражения. Однако можно проанализировать волновую картину на наличие помех. Примеры визуализации модуля преобразования Гильберта в программе GeoScan32 приведены на рис. 17.

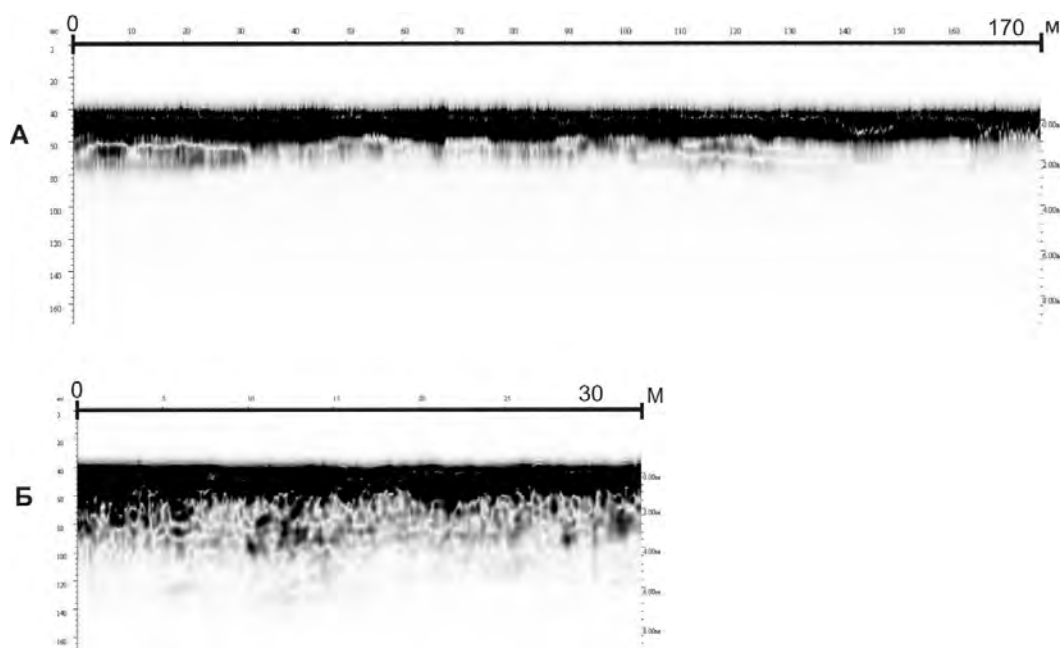


Рис. 17. Выделение огибающей (преобразование Гильберта). Условные обозначения: А – радарограмма по профилю 1, Б – радарограмма по профилю 2, вертикальная шкала слева – время электромагнитной волны, нс, вертикальная шкала справа – глубина, м, горизонтальная шкала – расстояние, м.

[Fig. 17. Envelope extraction (Hilbert transform). Legend: A - radargram along profile 1, B - radargram along profile 2, vertical scale on the left - electromagnetic wave time, ns, vertical scale on the right - depth, m, horizontal scale - distance, m.]

Преобразование Фурье. Программа GeoScan32 позволяет представить сигналы на радарограмме не только в волновых, но и в частотных формах, через вычисление преобразования Фурье (рис. 18). В результате на радарограммах при таком отображении верхняя часть изображения представляет собой амплитудный спектр, а нижняя часть изображения - соответствующий ему фазовый спектр. Фазовый угол, отображаемый в поле спектра, лежит в пределах от $-\pi$ до π рад. Однако для улучшения визуализации при отображении фазы используется масштабирование с коэффициентов 104. Таким образом, на визирке в фазовой части спектра можно наблюдать циклические изменения кривой от -104π до 104π , что соответствует обычному вращению фазы. Способ отображения позволяет достичь цели обработки – найти сигнал, несущий информацию о расположении объектов и знаке отражения.

С помощью визирки можно увидеть параметры сигнала в виде отклика среды на посылку импульса передающей антенны (пример, рис. 19, 20).

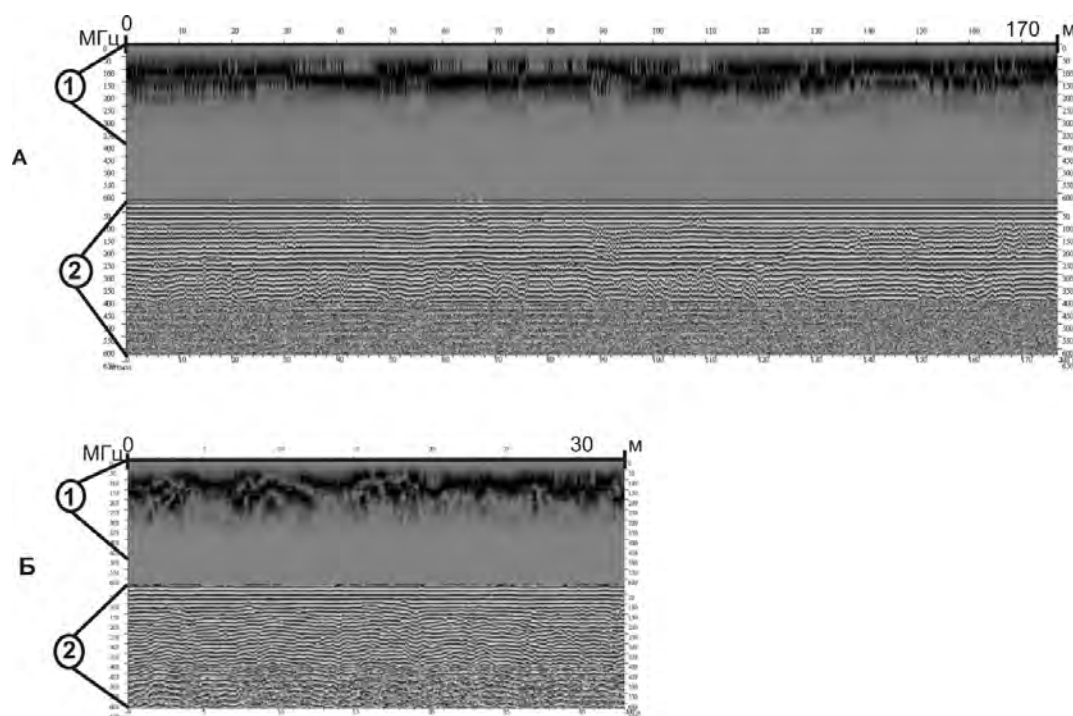


Рис. 18. Поле спектров (преобразование Фурье). Условные обозначения: А – по профилю 1; Б – по профилю 2. Цифры в кружочках: 1 – амплитудный спектр; 2 – фазовый спектр.

[Fig. 18. Spectral field (Fourier transform). Legend: A - along profile 1; B – along profile 2. Numbers in circles: 1 – amplitude spectrum; 2 - phase spectrum.]

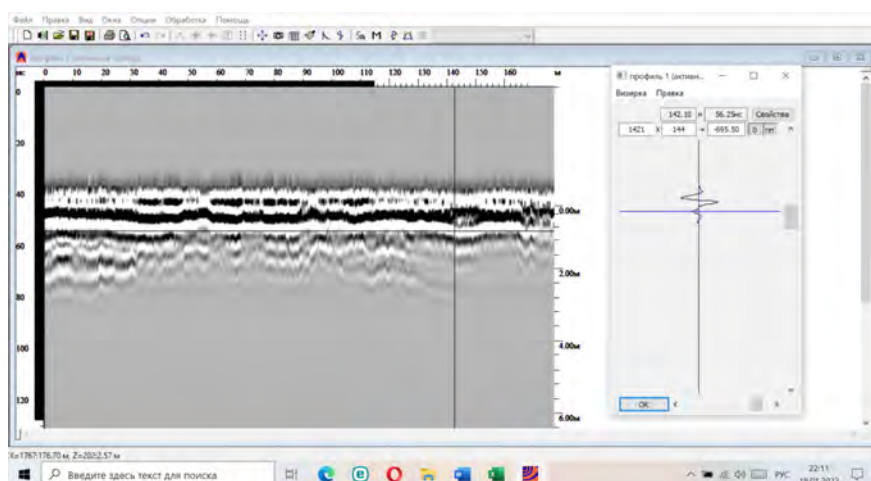


Рис. 19. Пример положения визирки (справа) на радарограмме (слева): 56.25 нс, положение трассы 142.1 м, амплитуда отраженного сигнала -695.50 (белая полуволна).

[Fig. 19. An example of the position of the sight (right) on the radargram (left): 56.25 ns, track position 142.1 m, amplitude of the reflected signal -695.50 (white half-wave).]

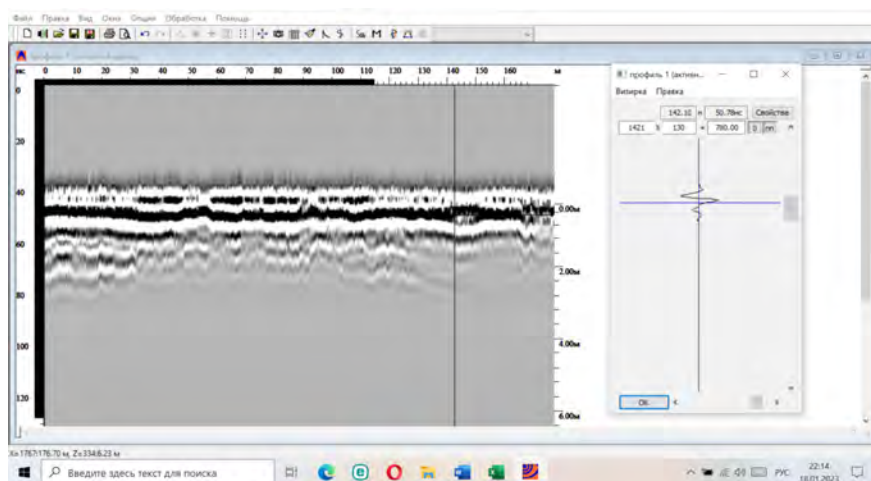


Рис. 20. Пример положения визирки (справа) на радарограмме (слева): 50.78 нс, положение трассы 142.1 м, амплитуда отраженного сигнала 780.00 (черная полуволна).

[Fig. 20. An example of the position of the sight (right) on the radargram (left): 50.78 ns, track position 142.1 m, amplitude of the reflected signal -780.00 (white half-wave).]

Ясно, что для проведения анализа радарограмм с привлечением различных математических методов, необходимо иметь данные в цифровой форме. Программа GeoScan32 позволяет конвертировать данные из внутреннего формата в текстовый формат. Наиболее универсальными являются текстовые файлы амплитуд отраженных сигналов, где данные структурированы в виде таблиц, причем столбцы соответствуют позициям на трассе, а строки – временам прихода отраженной электромагнитной волны. Такой формат хранения цифровых данных аналогичен самим радарограммам, что удобно для анализа и сопоставления. Шаг дискретизации данных по времени составляет 0.390625 нс, а по расстоянию (позиции на трассе) составляет 0.1 м. Отрицательные значения амплитуд отраженных сигналов соответствуют белым полуволнам, а положительные – черным. На рис. 21 представлен фрагмент файла для профиля 1. Это файл содержит 511 отсчетов по времени (строк), что соответствует 200 с общего времени, и содержит 1768 отсчетов по позиции на трассе (столбцов), что соответствует 176.8 м трассы. Аналогичный файл для профиля 2 содержит 511 строк и 330 столбцов (протяженность трассы 33 м).

С данными в таких файлах можно проводить уже любые математические манипуляции, как с помощью различных программных пакетов анализа данных, так и с помощью собственных авторских программ.

Рассмотрим в качестве примера результаты некоторых возможных обработок. В первом случае был рассчитан усредненный вдоль трассы отраженный сигнал. Из представленных выше радарограмм видны слоистые, приблизительно горизонтальные, структуры под трассами.

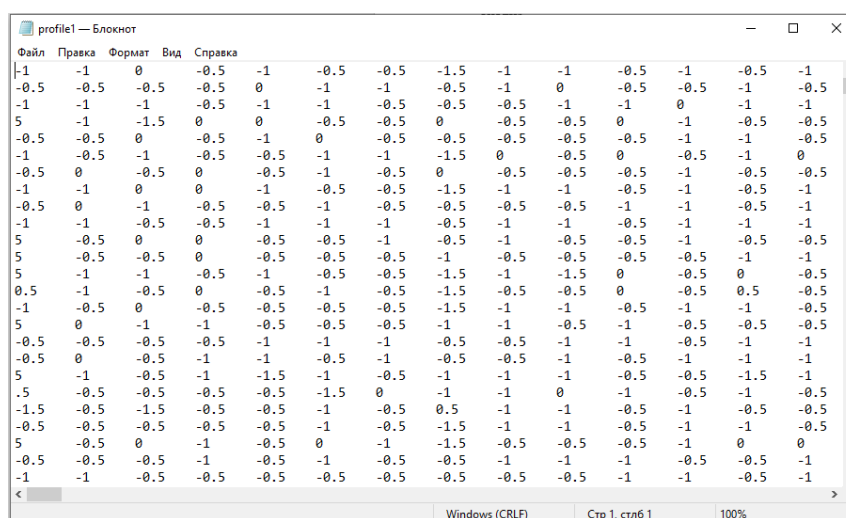


Рис. 21. Радарограмма профиля 1 в цифровой форме.

[Fig. 21. Radargram in the form of a digital table.]

Однако отличить абсолютные значения амплитуд отраженных сигналов для различных слоев по самим радарограммам практически невозможно. Усредненный сигнал позволяет это сделать, в целом, для слоя. На рис. 22 приведены усредненные сигналы для профилей.

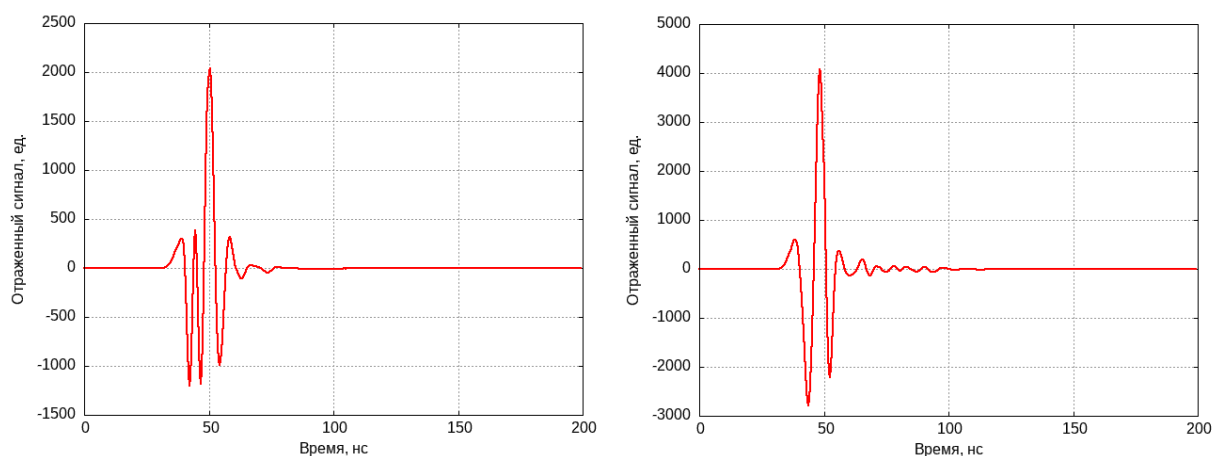


Рис. 22. Усредненные вдоль трасс амплитуды отраженных сигналов. Слева – профиль 1, справа – профиль 2.

[Fig. 22. Amplitudes of reflected signals averaged along the paths. Left – profile 1, right – profile 2.]

Следующий пример возможной обработки – это построение матрицы корреляций между сигналами для различных позиций вдоль трассы. Корреляция рассчитывается между синхронным сигналами, т.е. дает информацию о согласованности структур среды на совпадающих глубинах между различными позициями. Области корреляций, близких к единице, позволяют выделить

подобные между собой по амплитудам отраженного сигнала участки среды. Визуальный анализ радарограмм также не позволяет детально выявить такие структуры. Карты корреляций для профилей представлены на рис. 23 и 24.

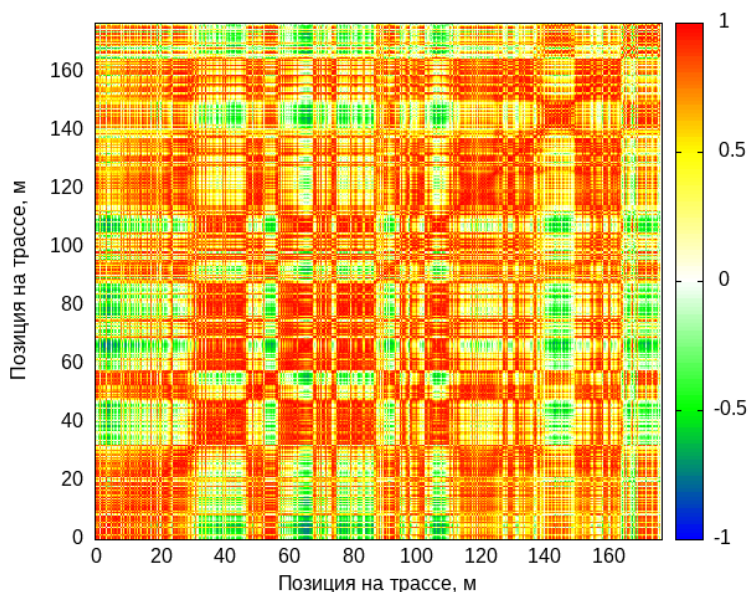


Рис. 23. Карта корреляций между отраженными сигналами при различных положениях на профиле 1.

[Fig. 23. Map of correlations between reflected signals at different positions on prof. 1.]

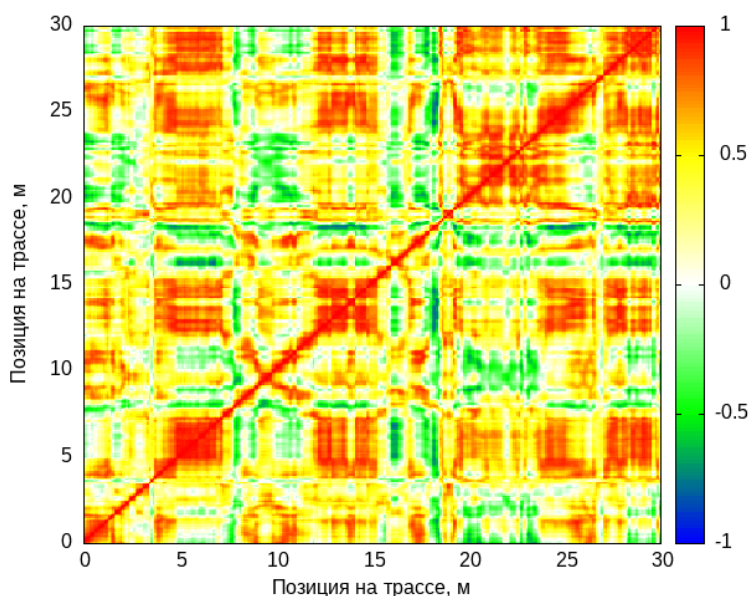


Рис. 24. Карта корреляций между отраженными сигналами при различных положениях на профиле 2.

[Fig. 24. Map of correlations between reflected signals at different positions on prof. 2.]

Из рис. 23, например, видно, что участки [30 м; 40 м] вдоль профиля 1 структурно подобны участкам [55 м; 90 м] и [105 м; 110 м]. Аналогично, из рис. 24 видно, что участки [4 м; 7 м] вдоль профиля 2 структурно подобны участкам от [12 м; 15 м], [24 м; 25 м] и [27 м; 30 м].

Заключение

По итогам данной работы можно сделать следующие основные выводы:

1. Метод георадиолокации возможно применять в кратерах активных вулканов для геологического картирования приповерхностных отложений.
2. Следует применять прибор георадар с более низкой центральной частотой, что обеспечит большую глубину зондирования.
3. Представленные методы дополнительной обработки радарограмм позволяют детально проанализировать волновую картину. Их выбор будет зависеть от поставленных целей, решаемых задач и возможностей программного обеспечения.

Список литературы

1. Мелекесцев И. В., Брайцева О. А., Пономарева В. В., Сулержицкий Л. Д. Возраст и динамика формирования действующих вулканов Курило-Камчатской области, *Изв. АН СССР. Сер. геол.*, 1990. № 4, С. 17–31.
2. Мелекесцев И. В., Брайцева О. А., Пономарева В. В. Динамика активности вулканов Мутновский и Горелый в голоцене и вулканическая опасность для прилегающих районов, *Вулканология и сейсмология*, 1987. № 3, С. 3–18.
3. Селянгин О. Б., Пономарева В. В. Строение и развитие Гореловского вулканического центра, Южная Камчатка, *Вулканология и сейсмология*, 1999. № 2, С. 3–23.
4. Кирсанов И. Т., Озеров Ю. А. Состав продуктов и энергетический эффект извержения вулкана Горелый в 1980–1981 гг., *Вулканология и сейсмология*, 1983. № 1, С. 25–43.
5. Кирсанов И. Т. Вулкан Горелый, его геологическое строение, последние извержения и состав продуктов / *Вулканизм и связанные с ним процессы. Вып. 1*. Петропавловск-Камчатский, 1985, С. 32.
6. Селянгин О. Б. *К вулканам Мутновский и Горелый. Вулканологический и туристический путеводитель*. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2009. 108 с.
7. Чебров В. Н., Дроздин Д. В., Кугаенко Ю. А. и др. Система сейсмологических наблюдений на Камчатке на пороге 50-летия / *Труды научно-технической конференции*, Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Обнинск, ГС РАН, 2011, С. 35–42.
8. Гарбузова В. Т., Соболевская О. В. Обновленная классификация вулканических землетрясений П. И. Токарева / *Труды научно-технической конференции*, II регион. науч.-техн. конф.. Петропавловск-Камчатский, КФ ГС РАН, 2010, С. 25–29.
9. Пупатенко В. В., Сухобок Ю. А. Литологическое расчленение разреза по данным георадиолокации, *Инженерная экология*, 2013. № 3, С. 154–161.
10. *Вопросы подповерхностной радиолокации*. Москва: Радиотехника, 2005. 65 с.
11. *Техническое описание. Инструкция по эксплуатации. Око-2*. Раменское: ООО «Логические Системы», 2007. 93 с.
12. Старовойтов А. В. *Интерпретация георадиолокационных данных*. М.: МГУ, 2008. 52 с.
13. Бендат Дж., Пирсол А. *Прикладной анализ случайных данных*. М: Мир, 1989.

Информация об авторах



Павлова Вероника Юрьевна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры биологии и наук о Земле, ведущий научный сотрудник международной интегративной научно-исследовательской лаборатории экстремальных явлений Камчатки Камчатского государственного университета имени Витуса Беринга», Петропавловск-Камчатский, Россия,  ORCID 0000-0003-4753-1928.



Водинчар Глеб Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Системы управления» Камчатского государственного технического университета, Петропавловск-Камчатский, Россия,  ORCID 0000-0002-5516-1931.



Некрасова Мария Юрьевна – инженер первой категории отдела радиотелеметрических сейсмических станций КФ ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский, Россия,  ORCID 0009-0009-9848-0869.

References

- [1] Melekestsev I.V., Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D. Age and dynamics of formation of active volcanoes in the Kuril-Kamchatka region. *Izv. Academy of Sciences of the USSR. Ser. geol.* 1990. no. 4. pp. 17-31 (In Russian).
- [2] Melekestsev I.V., Braitseva O.A., Ponomareva V.V. Dynamics of activity of Mutnovsky and Gorely volcanoes in the Holocene and volcanic danger for adjacent areas. *Vulcanology and seismology*, 1987. no. 3, pp. 3-18 (In Russian).
- [3] Selyangin O.B., Ponomareva V.V. Structure and development of the Gorelovsky volcanic center, South Kamchatka. *Vulcanology and seismology*, 1999. no. 2, pp. 3-23 (In Russian).
- [4] Kirsanov I.T., Ozerov Yu.A. Composition of products and energy effect of the Gorely volcano eruption in 1980–1981. *Vulcanology and seismology*, 1983. no. 1, pp. 25-43 (In Russian).
- [5] Kirsanov I.T. Gorely volcano, its geological structure, recent eruptions and composition of products. *Volcanism and related processes*. 1985. no. 1, P. 32 (In Russian).
- [6] Selyangin O.B. K vulkanam Mutnovskiy i Gorelyy. *Vulkanologicheskii i turisticheskii gid* [To the volcanoes Mutnovsky and Gorely. Volcanological and tourist guide]. Petropavlovsk-Kamchatsky: Hold. comp. "New Book 2009. 108 p (In Russian).
- [7] Chebrov V.N., Droznin D.V., Kugaenko Yu.A. et al. Sistema seysmologicheskikh nablyudeniy na Kamchatke v preddverii svoyego 50-letiya [The system of seismological observations in Kamchatka on the threshold of its 50th anniversary]. *Problems of integrated geophysical monitoring of the Russian Far East. Tr. sci.-tech. Conf., Obninsk: GS RAN*, 2011, pp. 35–42 (In Russian).
- [8] Garbuzova V.T., Sobolevskaya O.V. Obnovlennaya klassifikatsiya vulkanicheskikh zemletryaseniy P.I. Tokareva [Updated classification of volcanic earthquakes by P.I. Tokareva]. *Problems of integrated geophysical monitoring of the Russian Far East. II region. sci.-tech. Conf., Petropavlovsk-Kamchatsky: KF GS RAS*, 2010, pp. 25-29 (In Russian).
- [9] Pupatenko V.V., Sukhobok Yu.A. Lithological division of the section according to GPR data. *Engineering Ecology*, 2013. no. 03. pp. 154-161 (In Russian).
- [10] Problemy podpoverkhnostnoy radiolokatsii [Issues of subsurface radar]. Moscow: Radiotekhnika, 2005. P. 65 (In Russian).
- [11] Tekhnicheskoye opisaniye. Rukovodstvo pol'zovatelya. Oko-2 [Technical description. User manual. Oko-2]. Ramenskoye: LLC "Logic Systems 2007. 93 p (In Russian).
- [12] Starovoitov A.V. Interpretatsiya georadarnykh dannykh [Interpretation of georadar data] Moscow: Moscow State University, 2008, pp. 42-52 (In Russian).
- [13] Bendat J., Peirsol A. Prikladnoy analiz sluchaynykh dannykh [Applied analysis of random data]. Moscow: Mir, 1989.

Information about authors



Pavlova Veronika Yurievna – PhD (Geol. & Mineral.), Assistant Professor of the Department of Biology and Earth Sciences, Leading Researcher at the International Integrative Research Laboratory of Extreme Phenomena in Kamchatka, Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia,  ORCID 0000-0003-4753-1928.



Vodinchar Gleb Mikhailovich – PhD (Phys. & Math.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Control Systems Department, Kamchatka Technical State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia,  ORCID 0000-0002-5516-1931.



Nekrasova Marya Yurievna – engineer of the first category of the department of radiotelemetric seismic stations, Kamchatsky branch of the Federal Research Center UGS RAS  ORCID 0009-0009-9848-0869.